

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

①1 N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

2 728 097

②1 N° d'enregistrement national :

94 14987

⑤1 Int Cl<sup>6</sup> : G 21 C 7/17, 21/18

**CETTE PAGE ANNULE ET REMPLACE LA PRECEDENTE**

①2 **DEMANDE DE BREVET D'INVENTION**

**A1**

②2 Date de dépôt : 13.12.94.

③0 Priorité :

④3 Date de la mise à disposition du public de la  
demande : 14.06.96 Bulletin 96/24.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du  
présent fascicule.*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

⑦1 Demandeur(s) : FRAMATOME SOCIETE ANONYME  
— FR et COGEMA COMPAGNIE GENERALE DES  
MATIERES NUCLEAIRES — FR.

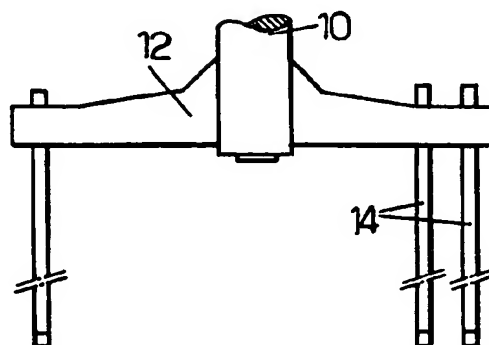
⑦2 Inventeur(s) : HERTZ DOMINIQUE et PILLET LUC.

⑦3 Titulaire(s) :

⑦4 Mandataire : CABINET PLASSERAUD.

⑤4 **GRAPPE DE COMMANDE ABSORBANTE POUR REACTEUR NUCLEAIRE.**

⑤7 Grappe de contrôle pour réacteur nucléaire comprenant une araignée à laquelle sont suspendus des crayons contenant un matériau à absorption des neutrons, dans certains au moins des crayons, le matériau est constitué, à leur partie inférieure, d'une colonne d'un alliage Ag-Sn-Cd et, à la partie supérieure, d'une colonne de pastilles de carbure de bore B<sub>4</sub>C, caractérisé en ce que, sur une fraction médiane de la hauteur de matériau absorbant comprise entre 35 et 45%, ledit matériau absorbant, est constitué de ZrB<sub>2</sub> enrichi isotopiquement en bore 10 ou de HfB<sub>2</sub>.



FR 2 728 097 - A1



**GRAPPE DE COMMANDE ABSORBANTE POUR REACTEUR NUCLEAIRE**

La présente invention concerne les grappes de commande destinées aux réacteurs nucléaires modérés et refroidis par de l'eau ; de telles grappes sont déplaçables verticalement par un mécanisme permettant de les insérer plus ou moins dans le coeur pour régler le flux neutronique, et donc pour régler la puissance du réacteur, et éventuellement pour amener et maintenir à l'arrêt le réacteur.

L'invention est notamment utilisable dans les réacteurs modérés et refroidis par de l'eau sous pression, dont le coeur est constitué par des assemblages de combustible ayant chacun un faisceau de crayons de combustible retenus aux noeuds d'un réseau régulier par un squelette formé d'embouts reliés par des tubes-guides portant des grilles de maintien des crayons. Dans ce cas, les grappes sont constituées par une araignée déplaçable par un mécanisme de commande et portant des crayons de matériau absorbant destinés à être insérés plus ou moins profondément dans les tubes guides ou même extraits totalement du coeur.

Habituellement, le réglage de puissance et l'arrêt du réacteur mettent en oeuvre plusieurs groupes de grappes de constitutions différentes (tels que des grappes dites "noires" très absorbantes et des grappes "grises" moins absorbantes), notamment lorsque le réacteur est prévu pour fonctionner en mode "suivi de charge", qui exige des déplacements fréquents et d'amplitude modérée des grappes de commande. Des modes de commande de ce type sont décrits par exemple dans les documents EP-A-0 051 542 (brevet FR 80 23452) et FR-A-2 639 141 (brevet FR 88 14771) auxquels on pourra se reporter.

Les grappes "noires", dont l'anti-réactivité est par exemple d'environ 150 pcm (parties pour cent mille), comportent un matériau fortement absorbant. Ce matériau peut notamment être un alliage argent-indium-cadmium, tel que

l'un de ceux décrits dans le document FR-A-1 214 215. Dans des réacteurs récents de 1300 MWe, certaines des grappes noires contiennent cependant un empilement composite, en alliage ternaire Ag-In-Cd à la partie inférieure qui est susceptible de séjourner pendant des durées importantes dans le coeur, en carbure de bore B<sub>4</sub>C à la partie supérieure.

Habituellement on utilise des grappes "grises", dont l'anti-réactivité est par exemple moitié de celle des grappes "noires", réparties pour régler la puissance. Elles sont souvent réparties en un premier groupe, inséré en premier dans le coeur lors d'une diminution de la puissance, et un second groupe, qui n'est introduit dans le coeur que lorsqu'on veut réduire la puissance du réacteur à un niveau compris entre 50% et 80% environ de la puissance nominale. Les grappes de ce second groupe ne sont complètement insérées que pour provoquer et maintenir l'arrêt du réacteur.

Pour faciliter l'exploitation des réacteurs du genre ci-dessus défini, de nouvelles règles de pilotage ont été développées, elles permettent d'effectuer, en même temps que le réglage de puissance, la régulation de température et la régulation de répartition axiale du flux neutronique.

Ces règles de pilotage exigent d'insérer certaines des grappes "noires" dans le coeur sur une hauteur beaucoup plus importante que la hauteur d'insertion nécessaire, en fonctionnement courant, avec les modes de pilotage antérieurs.

De plus, ces règles de pilotage nécessitent la présence, sur une partie de la hauteur des crayons des grappes noires qui jusqu'à présent était rarement insérée dans le coeur, en dehors des périodes d'arrêt, de matériau ayant une absorption neutronique plus importante que celle de l'alliage ternaire Ag-In-Cd.

Ce niveau d'absorption pourrait être obtenu avec des grappes dont les crayons contiennent, au-dessus d'une partie

inférieure chargée en Ag-In-Cd, une colonne de pastilles de  $B_4C$ . Mais la fluence au niveau de la partie médiane de l'empilement atteint des valeurs telles que du  $B_4C$  placé dans cette partie des crayons subirait un gonflement sous irradiation limitant la durée de vie des grappes en réac-  
5 teurs.

La présente invention vise notamment à fournir une grappe de commande "noire", ayant habituellement une anti-réactivité dépassant 150 pcm lorsqu'elle est totalement insérée, présentant dans ces conditions une durée de vie  
10 accrue lorsqu'elle est utilisée avec un mode de pilotage impliquant l'insertion fréquente de la grappe dans le coeur sur une profondeur importante.

Dans ce but, l'invention propose une grappe de contrôle pour réacteur nucléaire, comprenant une araignée à laquelle sont suspendus des crayons contenant chacun un matériau d'absorption des neutrons constitué, à la partie inférieure du crayon, par un absorbant métallique, tel que le hafnium, ou plus fréquemment, un alliage Ag-In-Cd et, à la partie  
15 supérieure du crayon, par une colonne de pastilles de carbure de bore  $B_4C$ , caractérisée en ce que, sur une fraction médiane du crayon, de hauteur comprise entre 35 et 45 % de la hauteur de matériau absorbant, ledit matériau absorbant est constitué de diborure de zirconium  $ZrB_2$ ,  
20 enrichi isotopiquement en bore 10, ou de diborure de hafnium  $HfB_2$ .  
25

L'alliage Ag-In-Cd (ou le hafnium) occupera généralement une fraction de la hauteur du matériau absorbant qui est comprise entre 30 et 40 %, fréquemment de 35 % environ, tandis que la colonne de  $B_4C$  occupera généralement une  
30 fraction de la hauteur de matériau absorbant comprise entre 20 et 30 % et typiquement 24 % environ.

Dans une telle grappe, la partie médiane des crayons, qui doit avoir une anti réactivité importante et qui est  
35 souvent plongée dans le coeur est constituée d'un matériau

gonflant beaucoup moins sous irradiation que  $B_4C$ . Alors que les pastilles dont le bore n'est pas enrichi de  $B_4C$ ,

présentent des dommages importants dès que la teneur en bore 10 consommé dépasse 16 % environ, avec un relâchement d'hélium compris entre 11 et 20 %, des résultats plus favorables sont obtenus avec  $ZrB_2$ , notamment enrichi à une teneur de 25 à 45 % en bore 10. Les résultats sont également améliorés avec  $HfB_2$ .

Une telle grappe de commande pour réacteur nucléaire est utilisable pour la régulation de puissance et le suivi de charge, et permet de concilier dans une large mesure les impératifs contradictoires ci-dessus. Elle propose dans ce but une grappe de contrôle pour réacteur nucléaire comprenant une araignée à laquelle sont suspendus des crayons contenant un matériau à absorption des neutrons, dans certains au moins des crayons, le matériau est constitué, à leur partie inférieure, d'une colonne d'un alliage Ag-In-Cd et, à la partie supérieure, d'une colonne de pastilles de carbure de bore  $B_4C$ , caractérisé en ce que, sur une fraction médiane de la hauteur de matériau absorbant comprise entre 35 et 45 %, ledit matériau absorbant est constitué de  $ZrB_2$  enrichi isotopiquement en bore 10 ou de  $HfB_2$ . La partie supérieure occupe 20 à 30 % de la hauteur et la partie inférieure en alliage Ag-In-Cd 30 à 40 % de la hauteur.

L'invention propose également un réacteur nucléaire du genre ci-dessus défini, comprenant des grappes de crayons déplaçables entre le coeur et des internes supérieurs du réacteur par des moyens de commande, les dites grappes comprenant des grappes noires et des grappes grises, d'anti-réactivité inférieure à celle des grappes noires, de régulation de puissance, caractérisé en ce que certaines seulement des grappes noires ont la constitution ci-dessus définie.

Lorsque, ce qui est un cas fréquent, les grappes noires sont réparties en deux groupes, dont l'un est inséré fréquemment l'autre pour amener le réacteur à une puissance

faible ou l'arrêter, ce sont les grappes appartenant au groupe inséré dans le coeur en premier qui ont la constitution ci-dessus définie.

5 L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui suit de modes particuliers de réalisation de l'invention, donnés à titre d'exemples non limitatifs. La description se réfère aux dessins qui l'accompagnent, dans lesquels :

10 - la figure 1 est un schéma de principe montrant une répartition possible suivant l'invention de grappes noires et grises dans le coeur d'un réacteur nucléaire à eau sous pression ;

- la figure 2 montre schématiquement l'araignée d'une grappe et les crayons qu'elle soutient, en plan ;

15 - la figure 3 montre une répartition possible des absorbants dans une grappe noire de pilotage.

On décrira maintenant des modes possibles de mise en oeuvre de l'invention, appliqués à un réacteur dont le coeur est constitué d'assemblages à section droite carrée, ayant la répartition donnée en figure 1. Mais l'invention est également applicable à des réacteurs différents, à réseau hexagonal et/ou pouvant comporter, en plus des grappes provoquant seulement une absorption parasite de neutrons, des grappes de variation du spectre d'énergie des neutrons.

20 Sur la figure 1, seul a été représenté l'emplacement de grappes que des mécanismes de commande permettent d'enfoncer dans le coeur ou de retirer du coeur. Les emplacements désignés par  $X_1$  à  $X_5$  reçoivent des grappes de régulation, parmi lesquelles celles désignées par  $X_2$  sont des grappes "noires". Les emplacements désignés par SA, SB, SC et SD reçoivent des grappes d'arrêt.

25 Les crayons des grappes aux emplacements  $X_1$  peuvent, de façon classique, contenir, sur toute leur hauteur, un même matériau absorbant des neutrons, tel qu'un alliage ternaire Ag-In-Cd à 80% d'argent, 15% d'indium et 5% de cadmium en

30

35

poids. Elles peuvent également contenir un barreau d'un alliage Ag-In-Cd à leur partie inférieure, des pastilles de  $B_4C$  à leur partie supérieure.

Chaque grappe a souvent la constitution montrée en figure 2. Elle comporte une araignée 10 dont le pommeau est prévu pour être fixé à une tige de commande et dont les bras rayonnants 12 portent chacun un ou deux crayons. La grappe montrée à titre d'exemple sur la figure 2 comporte vingt quatre crayons.

Comme le montre la figure 2 (où l'échelle n'est pas respectée pour plus de clarté), chaque crayon 14 comporte une gaine 16 fermée par des bouchons 18 et contenant une colonne de matériaux absorbants retenue en appui contre le bouchon inférieur par un ressort 20 comprimé entre la colonne et le bouchon supérieur.

Dans un des types de réacteur à eau sous-pressure utilisés à l'heure actuelle, ayant une puissance de 1450 MWe, tous les crayons ont une longueur de 4300 mm environ, et sont occupés par des matériaux absorbants sur une hauteur de 4150 mm, l'espace libre 19 servant de "plenum" volume de collecte de l'hélium provenant de la filiation du bore 10 lorsque ce dernier absorbe des neutrons.

Le matériau absorbant 22 placé à la partie inférieure du crayon est constitué par de l'alliage Ag-In-Cd, ou de Hf, par exemple sous forme d'un barreau massif, dont la hauteur est comprise entre 30 et 40 %, généralement 35 % environ, de la hauteur de la colonne.

La partie supérieure de la colonne de matériaux absorbants, qui n'est plongée dans un flux neutronique intense que peu fréquemment et doit être un matériau à forte section de capture, est constituée par un empilement 24 de pastilles de  $B_4C$ , dans lequel le bore présente sa teneur naturelle en bore 10.

La fraction médiane de la colonne de matériaux

absorbants est constituée par un empilement de pastilles d'un matériau qui :

- présente une section de capture neutronique au moins du même ordre que celle de  $B_4C$ ,

5 - présente, à taux d'épuisement en bore 10 égal, et pour la même géométrie, un gonflement sous irradiation plus faible que celui de  $B_4C$ ,

- à efficacité équivalente, présente une masse qui n'est pas notablement supérieure,

10 - a un comportement en corrosion dans l'eau sous pression au moins équivalent à celui de  $B_4C$ .

Dans un premier mode de réalisation, la fraction médiane de la colonne est constituée par des pastilles frittées en  $HfB_2$  ; qui a l'intérêt d'être constitué de deux atomes  
15 absorbants, puisque l'isotope 177 du hafnium a une forte section de capture neutronique et se transforme, après absorption neutronique, en  $Hf178$  qui lui aussi est très absorbant.

Pour les modes de pilotage envisagés à l'heure actuelle, la fraction de la hauteur de la colonne absorbante occupée  
20 par  $HfB_2$  sera comprise entre 35 % et 45 %, souvent d'environ 41 % lorsque l'alliage Ag-In-Cd occupe une fraction de 35 %. Dans ce cas, en effet, les pastilles en carbure de bore des crayons sont placées suffisamment haut pour ne subir des  
25 niveaux de flux élevés que pendant des périodes de temps peu importantes.

Une première solution consiste à utiliser des pastilles pleines, frittées dans des conditions telles que la densité des pastilles soit d'environ 70 % de la densité théorique.  
30 Ainsi, l'augmentation de masse d'un crayon, par rapport à ceux couramment utilisés à l'heure actuelle, dans lequel des pastille de  $B_4C$  sont à la place des pastilles de  $HfB_2$ , reste modérée et permet d'utiliser les mêmes mécanismes de commande des grappes. Cette solution a notamment l'intérêt  
35 de permettre d'utiliser les mêmes mécanismes de commande



pour toutes les barres noires.

Une autre solution consiste à utiliser des pastilles annulaires de  $\text{HfB}_2$ , de façon à réduire le volume des pastilles : il est alors possible d'utiliser des pastilles annulaires frittées dans des conditions telles que la densité de  $\text{HfB}_2$  atteigne jusqu'à 95 % de la densité théorique. Une chemise interne en alliage à base de zirconium peut alors être utilisée pour centrer les pastilles les unes par rapport aux autres. Cette solution permet de profiter de la meilleure tenue mécanique de pastilles de densité plus élevée.

A titre d'exemple, on peut indiquer qu'un crayon destiné à une grappe noire peut comporter une gaine de 4340 mm de longueur interne, occupée sur 145 cm par Ag-In-Cd, sur 170 cm par  $\text{HfB}_2$  et sur 100 cm par  $\text{B}_4\text{C}$ , ce qui laisse subsister un volume de collecte d'hélium ou plenum de 19 cm. Le barreau d'Ag-In-Cd peut être étagé. Le diamètre extérieur, par exemple de 8,53 mm en partie basse sur une hauteur de 75 cm, peut être augmenté de 0,10 à 0,15 mm en partie haute, dans une gaine de 8,73 mm de diamètre intérieur.

Il n'est pas nécessaire de prévoir une atmosphère d'hélium sous pression dans le plenum 19 : le dégagement d'hélium formé par l'absorption de neutrons par le bore et relâché sous irradiation établit en effet rapidement une pression suffisante.

Dans un autre mode de réalisation, la partie médiane de la colonne est constituée par un empilement de pastilles de  $\text{ZrB}_2$ . Les hauteurs du barreau d'Ag-In-Cd, de l'empilement de pastilles en  $\text{ZrB}_2$  et de l'empilement de pastilles de  $\text{B}_4\text{C}$  peuvent être les mêmes que dans le cas précédent. Le barreau d'Ag In Cd aura généralement encore un diamètre un peu plus faible (de 0,10 à 0,15 mm) sur environ la moitié de sa hauteur. Les pastilles de  $\text{ZrB}_2$  et de  $\text{B}_4\text{C}$  peuvent avoir un diamètre nominal de 1 mm inférieur à celui du cas précédent.

Pour que l'empilement de  $\text{ZrB}_2$  ait une absorption neutro-

5 nique comparable à celle des pastilles de  $B_4C$  qu'il remplace, le bore sera généralement enrichi à 30 % environ de bore 10, si les pastilles sont frittées de façon à avoir environ 80 % de leur densité théorique. La teneur en bore 10 peut être réduite, jusqu'à 25 % environ, lorsque les pastilles ont une densité accrue, jusqu'à 95 % de la densité théorique.

10 Le diborure de zirconium et le diborure de hafnium permettant de mettre en oeuvre l'invention peuvent être fabriqués par boruration de l'oxyde correspondant, à la température d'environ 2000°C, en présence de carbone. La réaction peut être menée dans des conditions telles que le carbure résiduel ait une teneur ne dépassant pas 0,3 %. La présence de ce carbure améliore la frittabilité du diborure et permet d'atteindre, si on le souhaite, des densités allant jusqu'à 98 % de la densité théorique.

15

REVENDICATIONS

1. Grappe de contrôle pour réacteur nucléaire comprenant une araignée à laquelle sont suspendus des crayons contenant un matériau à absorption des neutrons, le matériau étant constitué dans certains au moins des crayons, à leur partie inférieure, d'une colonne d'absorbant d'un alliage Ag-In-Cd et, à la partie supérieure, d'une colonne de pastilles de carbure de bore B<sub>4</sub>C,

caractérisé en ce que, sur une fraction médiane de la hauteur de matériau absorbant, comprise entre 35 et 45 %, ledit matériau absorbant est constitué de ZrB<sub>2</sub> enrichi isotopiquement en bore 10 ou de HfB<sub>2</sub>.

2. Grappe selon la revendication 1, caractérisée en ce que la partie supérieure en B<sub>4</sub>C occupe 20 à 30 % de la hauteur et la partie inférieure, en hafnium ou alliage Ag-In-Cd, 30 à 40 % de la hauteur.

3. Grappe selon la revendication 2, caractérisée en ce que la partie supérieure occupe 24 % de la hauteur environ, la partie inférieure une fraction d'environ 35 % et la fraction médiane 41 % environ.

4. Grappe selon la revendication 1, 2 ou 3, caractérisée en ce que ladite fraction médiane est en ZrB<sub>2</sub> enrichi en bore 10 à une teneur comprise entre 25 et 30 %, ayant une densité comprise entre 80 et 95 % de la densité théorique.

5. Grappe selon la revendication 1, 2 ou 3, caractérisée en ce que ladite fraction médiane est en diborure de hafnium, dont le bore est non enrichi, ayant une densité d'environ 70 % de la densité maximale théorique.

6. Grappe selon la revendication 1, 2 ou 3, caractérisée en ce que ladite fraction médiane est constituée d'un empilement de pastilles annulaires en HfB<sub>2</sub> à teneur naturelle en bore 10, ayant une densité comprise entre 70 et 95 % de la densité maximale théorique.

[illegible]

INSTITUT NATIONAL  
de la  
PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLERAPPORT DE RECHERCHE  
PRELIMINAIRE  
établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la rechercheFA 510270  
FR 9414987

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		Revendications concernées de la demande examinée
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	
A	EP-A-0 364 910 (BBC REAKTOR GMBH) 25 Avril 1990 * colonne 1, ligne 1 - ligne 13 * * colonne 3, ligne 21 - ligne 38; figure 1 * ---	1
A	FR-A-2 663 776 (KABUSHIKI KAISHA TOSHIBA) 27 Décembre 1991 * page 33, ligne 3 - ligne 26 * * page 39, ligne 3 - ligne 12; figures 19,20 * ---	1-3
A	EP-A-0 212 920 (WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP) 4 Mars 1987 * page 6, ligne 4 - ligne 36; figures 1,2 * ---	1-3
A	KERNTECHNIK, vol. 57, no. 2, 1 Avril 1992 pages 102-106, XP 000292838 VESTERLUND G ET AL 'DEVELOPMENT OF ABB CONTROL RODS AND OPERATIONAL EXPERIENCE' * page 105 - page 106; figures 7,8 * -----	1
		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int. Cl. 4)
		G21C
Date d'achèvement de la recherche		Examinateur
31 Juillet 1995		Jandl, F
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES		
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : pertinent à l'encontre d'au moins une revendication ou arrière-plan technologique général O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		
T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande I : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant		

THIS PAGE BLANK (USPTO)